

# МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЯ СЛОЕВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРУТКОВ AL-CU СВАРЕННЫХ МЕТОДОМ ВЗРЫВА

## METALLOGRAPHIC ANALYSIS AND TESTING OF THE QUALITY CONNECTION LAYERS IN EXPLOSIVE WELDED AL-CU BIMETALLIC BARS

БОУСЕК СЕВЕРИН КРИСТОФОРОВИЧ, МРУЗ СЕБАСТЬЯН АНДРЕЕВИЧ,  
ДЫЯ ХЕНРЫК ИОСИФОВИЧ

Ченстоховский Технологический Университет  
Факультет Обработки Металлов Давлением и Инженерии Безопасности  
Ал. Армии Крайовой 19, 42-200 Ченстохова, Польша  
e-mail: seweryn.wasek@wip.pcz.pl; mroz@wip.pcz.pl; dyja@wip.pcz.pl;

### Abstract

In the paper have been investigated the microhardness, the microstructure and the bond strength of interface of bimetallic joint on the cross sections of the Al-Cu bimetallic bars. For the experimental analysis, a bimetallic bar was manufactured using an explosive technique method and the process of rolling. The systems and technological parameters of explosion welding were selected in such a manner as to obtain finished bimetallic bars of an outer diameter of approx. 22 mm and a copper area fraction of the bimetal cross-section of approx. 15 and 30%.

### Введение

Уже несколько лет в разных отраслях промышленности применяется биметаллические изделия: жёсть, ленту, трубы, прутки и проволоки. Их производится чтобы использовать разницы в свойствах металлы создающих биметалл, например тепловая расширяемость, электропроводность и механическую устойчивость. Среди проводимых биметаллы широко применяемыми являются биметаллические проволоки имеющие стержень из алюминия и медной плакирующий слой их производят главным образом для электроэнергетики, телекоммуникации и электроники. Биметаллические проволоки должны характеризоваться хорошим качеством соединения и равномерным распределением плакирующего слоя на их окружности и длине [1, 2]. В настоящее время при производстве заготовок в форме биметаллических прутков используется много методов, к которым можно причислить между прочем метод сварки путем взрыва [2]. Метод сварки путем взрыва, принадлежащий к группе

взрывной технологии обработки металла, заключается в соединении двух и больше элементов из металла обладающих разными физическими, механическими или термическими свойствами [1, 2].

### Сварка путем взрыва биметаллических прутков Al-Cu

В настоящей работе представлено методику проектирования технологии одного из этапов производства плакированных прутков из которых можно получить биметаллическую проволоку. Для исследований приготовлено два пакета образцов в состав которых входили трубы меди из типа M1E и прутки из алюминия типа 1050A. В исследованиях применено два варианта пакетов для сварки путем взрыва, благодаря чему получено разные расстояния между прутками и внутренними стенками труб. Форма и геометрические размеры цилиндрических систем для сварки представлено в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1

Размера прутков и труб примененных во время сварки путем взрыва

Номер пакета	Диаметр прутка из алюминия [мм]	Внутренний диаметр трубы из меди [мм]	Внешний диаметр трубы из меди [мм]	Расстояние между трубой и прутком [мм]	Толщина стенки трубы из меди [мм]	Внутренний диаметр трубы PVC [мм]
1	20	22	23,5	1	0,75	45
2	20	22	23,5	1	0,75	45
3	20	22	23,5	1	0,75	45
4	18	22	25	2	1,5	45
5	18	22	25	2	1,5	55

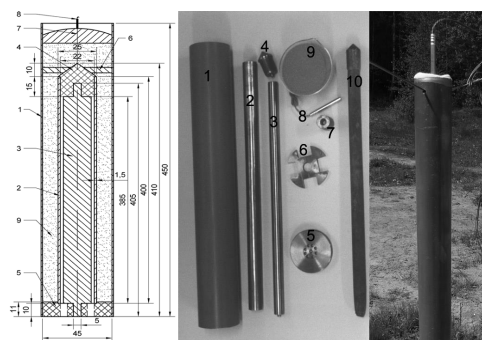


Рис. 1. Система для соединения трубы и прутка путем взрыва: 1 – труба PVC; 2 – труба из меди; 3 – пруток из алюминия; 4 – верхняя центрирующая пробка; 5 – нижняя центрирующая пробка; 6 – верхний центрирующий кружок; 7 – детонатор; 8 – взрыватель; 9 – сыпучий материал взрывной; 10 – готовый биметаллический пруток Al-Cu.

В случае большинства до сих пор опубликованных работ [3, 4] в случае сварки

биметаллических прутков путем взрыва применяли аммонал 2%. В настоящей работе в случае сварки путем взрыва применено более сильный взрывной материал – аммонал 5%, который состоял из мешанины аммониевой селитры (95%) и алюминиевой пыли (5%).

### Исследования геометрических изменения в готовых биметаллических прутках

После проведения детонации раньше приготовленных систем, получено биметаллические прутки без перехват, которые характеризовались прочным соединением на всей длине. На верхней и нижней поверхности прутков были вывернуты манжеты из меди, что могло быть вызвано слишком большим давлением отведенного воздуха находящегося между трубой из меди и прутком из алюминия. Размеры полученных образцов представлено в таблице 2.

Таблица 2

Размера биметаллических прутков после сварки путем взрыва

Номер образца	Средний диаметр внешний прутка [мм]	Доля плакирующего слоя Cu в поперечном сечении образца [%]	Толщина слоя Cu [мм]	Изменение толщины слоя Cu [мм]	Деформация слоя Cu [%]
1	21,81	15,9	0,90	0,15	20,0
2	21,80	15,8	0,90	0,15	20,0
3	21,78	15,7	0,89	0,14	18,7
4	21,79	31,5	1,88	0,38	25,3
5	21,75	31,4	1,87	0,37	24,7

Согласно данным находящим в таблице 2 следует, что после сварки путем взрыва получено разную толщину слоя из меди в биметаллических прутках, в сравнении с толщиной стен труб. Приращение толщины этого слоя составляло от 18,7 – 20 % для прутков полученных опираясь на систему 1 – 3 до 25,3% в случае прутков полученных согласно системе 4 и 5. Констатировано, что самое большое приращение толщины слоя из меди, в сравнении с исходной толщиной стены трубы, имело место в образцах полученных согласно системе для которой характерным является большая исходная толщина стен труб (система 4 и 5). Этот эффект возник вследствие увеличенного расстояния между трубой и прутком, которой в системе 4 и 5 составлял 2 мм и был на два раза больше чем в случае систем 1÷3. Расстояние между отдельными слоями систем изменяли через управление

внешними диаметрами труб и диаметрами стержни из алюминия. Управляя вышесказанными параметрами получено биметаллические прутки диаметром ок. 22 мм (внешний диаметр) и долей меди в поперечном сечении биметалла составляющей около 15 и 30%.

### Исследования микротвердости и качества соединения слоев биметаллических прутков

На рисунке 2 представлено микроструктуру в месте соединений. На этом рисунке представлено также результаты измерения средних значений микротвердости для мест соединения. Фотографий микроструктур и измерения микротвердости сделано для образцов 1, 2, 3 и 4 при помощи оптического микроскопа Nikon Eclipse MA-200 и микро - твердомера FM-700 фирмы FutureTech.

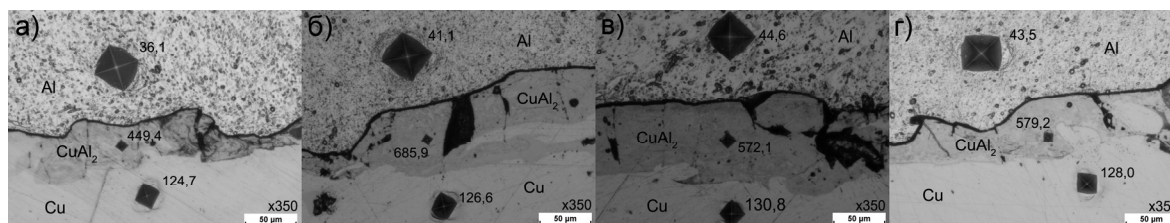


Рис. 2. Результаты измерения микротвердости HV0,05 месте соединения: а) образец номер 1, б) образец номер 2; в) образец номер 4, г) образец номер 5

Из данных указанных на рис. 2 следует, что место соединения биметаллического прутка Al-Cu состоит из трёх слоев: стержня из алюминия, внешнего слоя из меди и переплавленного слоя промежуточного  $\text{CuAl}_2$  который возник вследствие взрыва соединения. Место соединения является типичным соединением после сварки путем взрыва, нерегулярном о значительном расширению поверхности [2]. В месте соединения находятся слой  $\text{CuAl}_2$  который появился во время взрывного соединения. Согласно рисунку, представленные средние значения микротвердости для определенных компонентов биметалла отвечают результатам исследований представленным на рисунке 3. Особенное внимание надо обратить на

возникший промежуточный слой  $\text{CuAl}_2$ , для которого характеристическими являются высокие значения микротвердости для всех исследуемых образцов.

Исследование распределения микротвердости проведено для 4 выбранных биметаллических образцов после сварки путем взрыва согласно системе 1, 2, 4 и 5 а также для образцов из исходных материалов (прутка из алюминия и трубы из меди). Измерение микротвердости способом Vickersa проведено на поперечных сечениях образцов, согласно норме PN-EN ISO 6507-1 1999. Результаты этих исследований представлено на рис. 3.

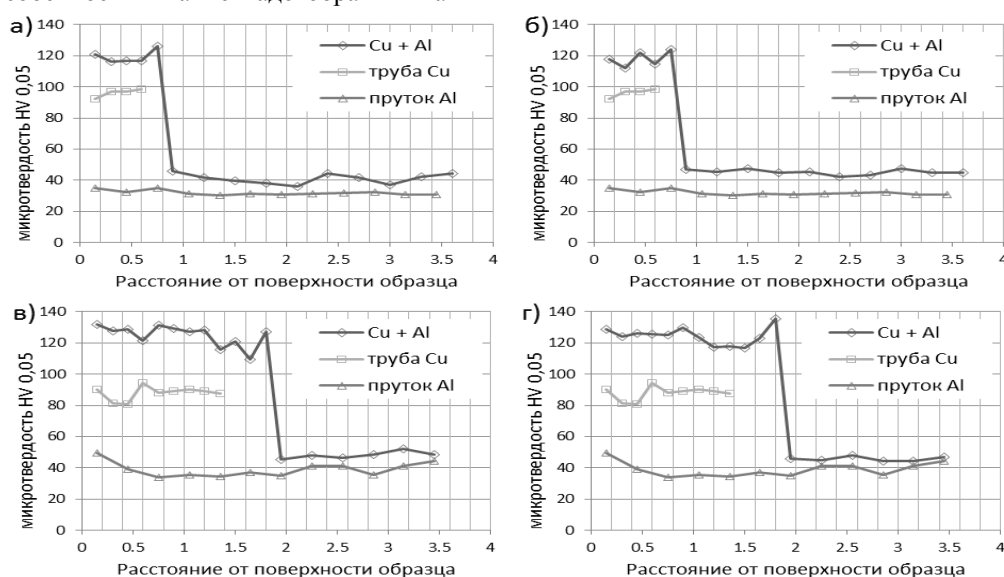


Рис. 3. Распределение микротвердости для шихты и готовых биметаллических прутков: а) образец номер 1, б) образец номер 2; в) образец номер 4, г) образец номер 5

Во время сравнения представленных на рис. 3 распределений микротвердости в исходном материале и готовых биметаллических прутков после сварки путем взрыва можно заметить что появилось их увеличение в определенных слоях после соединения взрывом. Это увеличение возникло вследствие упрочнения материала во время сварки путем взрыва и деформацией плакирующего слоя. Самое значительное увеличение относительных значений микротвердости наблюдается в слое из меди, для образца 4 и 5, которое составляло соответственно 31 и 33%. Причиной этого эффекта было большое расстояние между трубой и прутком во время сваривания путем взрыва и большая деформация плакирующего слоя. В минимальной степени большое значение микротвердости представлено для образца 5, где добавочным фактором являлось применение трубы из PVC диаметром 55 мм, то есть большого количества взрывчатого материала. В случае образцов из пакета 1 и 2 увеличение значения микротвердости в слое из меди было ниже и составляло соответственно 23 и 24%. На упрочнение стержни из алюминия в биметаллических прутках влияло также исходное расстояние между стержнем и плакирующим слоем

в приготовленных пакетах. Наблюдено что, чем большее расстояние между трубой из меди и стержнем из алюминия во время сварки путем взрыва, тем увеличение значения микротвердоти алюминия в биметаллическом прутке меньше. Это увеличение составляло соответственно 12 и 22% для образцов 1 и 2 а в случае образцов 4 и 5 – 10 и 13 %.

Чтобы определить качество соединения между стержнем и плакирующим слоем готовых биметаллических прутков поведено исследования при помощи специальных тестирующих матриц для всех 5 образцов. Результаты этих исследований представлено на рисунке 4.

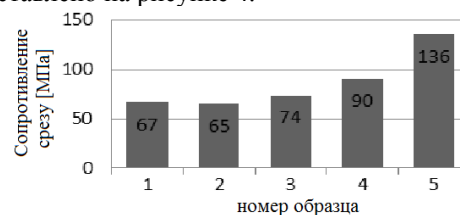


Рис. 4. Соппротивление срезу готовых биметаллических прутков Al-Cu.

Согласно данным представленным на рис. 4 следует, что самое большое значения напряжения

сжатия в месте соединения составляло соответственно 90 МПа для образца 4 и 136 МПа для образца номер 5. Разница значений напряжений сжатия между образцами полученными из биметаллических прутков с долей меди 15 % и 30 % составляла около 40 %. Этот эффект возник вследствие разных расстояний между трубой из меди и прутком из алюминия во время сварки путем взрыва. Констатируется, что чем большее исходное расстояние между свариваемыми компонентами, тем лучше качество соединений готовых биметаллических прутков. Значительное влияние на сопротивление срезу имело тоже применение большого количества взрывчатого вещества, что видно в результатах исследований образца 5.

### Металлографические исследования соединения

Последний этап исследований заключал в определении характера промежуточного слоя опираясь на анализ химического состава

микрообластей при помощи сканирового микроскопа JOEL JSM-5400 оснащенного в анализатор EDX. Микроанализу методом EDX проведено для двух выбранных образцов полученных из биметаллических прутков после сварки путем взрыва согласно системе 1 и 5. Результаты представлено в таблице 3 и на рисунке 5. Из представленных данных следует, что локально выступающий промежуточный слой  $\text{CuAl}_2$  является мешаниной меди и алюминия о содержании от 51-52 % Cu и от 48-49% Al для образца номер 1 и от около 54-99,5% Cu и от около 0,5-46% Al для образца номер 5. В микроструктуре образца 1 мешанину  $\text{CuAl}_2$  можно наблюдать вне области соединения, в виде её включения выступающего в сфере слоя из меди в биметаллическом прутке. Кроме того, особенное влияние надо обратить к области соединения в образце 2, в котором видна небольшая сфера обозначена точкой 1 о химическом составе, который состоит практически в 100% из меди.

Таблица 3

Процентная доля элементов в области соединения представленных на рисунке 5.

Обозначение рисунка	Обозначение места анализа	Доли элементов [% веса / % атомный]	
		Al	Cu
а	1	47,71 / 68,24	52,29 / 31,76
	2	49,29 / 69,60	50,71 / 30,40
б	1	0,43 / 1,00	99,57 / 99,00
	2	45,70 / 66,47	54,30 / 33,53

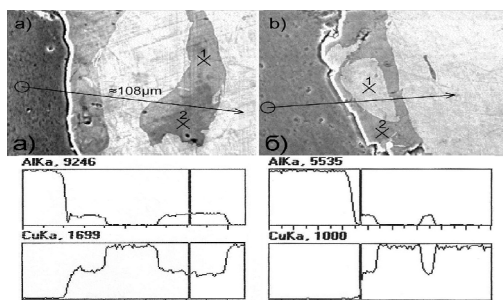


Рис. 5 Микроструктура области анализа EDX и распределения выбранных элементов на области анализа: а) образец номер 1, б) образец номер 5

### Подведение итогов

Опираясь на полученные исследования констатируется, что благодаря правильному подбору параметров сварки путем взрыва, получено биметаллический полуфабрикат характеризующийся круглой симметрией поперечного сечения. Кроме того, во всех полученных биметаллических прутках выступало увеличение толщины плакирующего слоя из меди, что свидетельствует о влиянии исходных размеров труб и прутков а также исходных расстояний между ними. Правильно подобраны параметры сварки путем взрыва гарантируют получение прочного соединения слоя из меди и прутка из алюминия, а качество соединения зависит от исходного расстояния между свариваемыми компонентами и количества примененного взрывчатого вещества. После сварки взрывом

биметаллических прутков возникло увеличение микротвердости исследуемых слоев по сравнению с исходными материалами, что вытекало из упрочнения и деформации.

Научная работа была финансирована из средств предназначенных для развития науки, в 2010-2012 гг, как проект номер N N508 583039.

### Библиография

1. Dyja H., Mróz S., Rydz D.: Technologia i modelowanie procesów walcowania wyrobów bimetalowych. Wydawnictwo WIPMiFS 2003, Seria Metalurgia Nr 33.
2. Sawicki S., Mróz S.: Analiza metod wytwarzania prętów bimetalowych stal – stal odporna na korozję, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Nowe Technologie i Osiągnięcia W Metalurgii i Inżynierii Materiałowej. 2006 Częstochowa. Materiały Konferencyjne Wydziału Inżynierii Procesowej Materiałowej i Fizyki Stosowanej. Seria Metalurgia nr 48. s. 495-499.
3. Dyja H., Mróz S., Stradomski Z.: Properties of joint in the bimetallic rods Cu - Al and Cu - steel after explosive cladding and the process of rolling. Metalurgija Metallurgy, 42nd year, vol. 42, br. 3, Zagreb, spranj/rujan, 2003, s. 185-191.
4. Berski S.: Teoretyczna oraz doświadczalna analiza procesu wyciskania prętów bimetalowych Al/Cu. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2005.